



KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT

Vahid Redžić

**Eksperimentalna i numerička analiza termomehaničkog ponašanja
aluminijske legure EN AW-6005A-T6 pri povišenim temperaturama**

Split, rujan 2026.

1. Uvod

1.1 O požaru općenito

Požar spada u grupu incidentnih djelovanja koja se mogu javiti tijekom eksploatacijskog vijeka konstrukcije. Kakve će posljedice požar imati na konstrukciju ovisi ponajprije o materijalu od kojeg je konstrukcija izvedena (čelik, beton, drvo, opeka, kompozitne konstrukcije i sl.) i postoji li sustav protivpožarne zaštite. S obzirom da ne možemo točno znati kada i na kojem dijelu konstrukcije će se javiti požar, naš zadatak kao projektanta konstrukcije jest osigurati dostatnu otpornost konstrukcije kako bismo izbjegli urušavanje konstrukcije i kako bismo mogli osigurati sigurnu evakuaciju ljudi. Iako danas postoje mnogi sustavi zaštite aluminijskih konstrukcija od požara počevši od sprinkler instalacija, zaštitnih vatrootpornih premaza, različitih vrsta zaštitnih ploča, propisi koji se odnose na vatrootpornost postaju sve strožiji iz razloga izbijanja sve češćih požara s velikim ljudskim i materijalnim gubitcima. Najveću ulogu u smanjenju nosivosti nekog konstrukcijskog elementa u požarnim uvjetima ima deformacija od puzanja. Kako bi se mogao shvatiti stvaran utjecaj požara na aluminijske konstrukcije potrebno je izvršiti niz studija na razini materijala i konstrukcije, te eksperimentalnu i numeričku verifikaciju rezultata ispitivanja. S obzirom na to da se danas aluminij sve češće koristi u građevinarstvu i građevinskim konstrukcijama javlja se potreba za detaljnom analizom utjecaja deformacija od puzanja na nosivost aluminijskih konstrukcija.

1.2 Primjena i karakteristike aluminija

Aluminij (Al) je lagani, srebrnasto-bijeli metal koji se odlikuje širokom primjenom u industriji zahvaljujući povoljnim fizikalnim i kemijskim svojstvima. Po rasprostranjenosti u Zemljinoj kori zauzima treće mjesto, odmah iza kisika i silicija, s udjelom od približno 8 %. U prirodi se ne pojavljuje u elementarnom stanju, već isključivo u obliku spojeva s drugim kemijskim elementima, među kojima su najčešći magnezij, silicij, mangan, bakar i cink. Legure aluminija koje se na taj način dobivaju odlikuju se vrlo dobrim mehaničkim svojstvima, uključujući i visoku žilavost pri niskim temperaturama. Zbog kombinacije male gustoće i povoljnih mehaničkih svojstava, aluminij i njegove legure široko se koriste u građevinarstvu, transportnoj industriji te u konstrukcijama izloženim zahtjevnim uvjetima okoline. Njegova primjena u građevinskim konstrukcijama posljednjih desetljeća bilježi porast upravo zbog trajnosti, otpornosti na koroziju i mogućnosti recikliranja. U tablici 1. prikazana je usporedba osnovnih fizikalnih svojstava aluminija i konvencionalnog konstrukcijskog čelika.

Tablica 1. Usporedba osnovnih fizikalnih svojstava aluminijskih legura u odnosu na fizikalna svojstva čelika [1]

Fizikalna svojstva / Metal	Aluminij / Al legure	Čelik
talište	660 °C	1425 – 1540 °C
gustoća pri 20°C	2700 kg/m ³	7850 kg/m ³
toplinsko izduljenje	23 · 10 ⁻⁶ °C ⁻¹	12 · 10 ⁻⁶ °C ⁻¹

specifična toplina	$\sim 920 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$	$\sim 440 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
toplinska provodljivost	$\sim 240 \text{ W/m}^\circ\text{C}$	$\sim 54 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
modul elastičnosti	$70\,000 \text{ N/mm}^2$	$210\,000 \text{ N/mm}^2$
modul posmika	$27\,000 \text{ N/mm}^2$	$81\,000 \text{ N/mm}^2$
Poisson-ov koeficijent	0,3	0,3

Struktura aluminija u određenoj je mjeri slična strukturi čelika, no njegova su mehanička svojstva osjetno slabija u odnosu na čelik. Kao što je prikazano u tablici 1., gustoća aluminija približno je tri puta manja od gustoće čelika [2]. Za razliku od čelika, aluminij ne podliježe hrđanju te pokazuje otpornost na progresivnu oksidaciju koja uzrokuje koroziju kod čelika. U slučaju oštećenja zaštitnog sloja, na površini aluminija spontano se formira novi sloj oksida koji sprječava daljnju degradaciju [2]. Iz tablice 1. također je vidljivo da je koeficijent toplinskog istezanja aluminija dvostruko veći nego kod čelika. Jedan od značajnih nedostataka aluminija u odnosu na čelik jest i veća osjetljivost na zamorna oštećenja.

Glavni nedostatak aluminija proizlazi iz činjenice da degradacija njegovih mehaničkih svojstava počinje već pri temperaturama nešto višim od 100°C , dok je njegova cijena približno pet puta viša od cijene čelika. Osim toga, zbog osjetljivosti na povišene temperature, deformacije uslijed puzanja javljaju se već pri približno 150°C .

Unatoč prethodno navedenim nedostacima, aluminij pokazuje niz značajnih prednosti koje ga čine atraktivnim građevinskim materijalom:

- mala gustoća – aluminij je približno 2,9 puta lakši od čelika, što značajno smanjuje ukupnu masu konstrukcija te olakšava transport i ugradnju,
- otpornost na koroziju – osigurava dug vijek trajanja konstrukcija i smanjuje troškove održavanja tijekom eksploatacijskog razdoblja,
- povoljna fizikalna svojstva – aluminij učinkovito reflektira svjetlost i toplinu, nije feromagnetičan, ne pokazuje kancerogena svojstva te se smatra materijalom bez značajnih negativnih utjecaja na okoliš.

Neke od mogućnosti primjene aluminija u građevinskim konstrukcijama obuhvaćaju širok spektar rješenja zahvaljujući njegovoj maloj gustoći, otpornosti na koroziju i jednostavnoj preradivosti:

- **krovne konstrukcije** – osobito u obliku rešetkastih prostornih sustava i kupola velikih raspona, gdje se aluminij koristi zbog povoljnog omjera čvrstoće i mase, što omogućava smanjenje ukupne težine konstrukcije,
- **mostovi, krovne konstrukcije bazena i hidrotehničke građevine** – aluminij je u tim slučajevima primjenjiv zbog otpornosti na djelovanje vlage, kemikalija i agresivnih okolišnih uvjeta, čime se značajno produžuje vijek trajanja konstrukcija uz minimalne zahtjeve održavanja,

- **sanacijski radovi na povijesnim građevinama** – lagane aluminijske konstrukcije ne uzrokuju značajna dodatna opterećenja na postojeće konstrukcijske elemente, što ih čini pogodnima za intervencije u zaštićenim i osjetljivim objektima,
- **konstrukcije unutarnjih stubišta, rukohvati i ograde** – osim povoljnih mehaničkih svojstava, aluminij omogućava i estetski atraktivna arhitektonska rješenja te jednostavno održavanje tijekom uporabe.

Zahvaljujući navedenim karakteristikama, aluminij se sve češće razmatra kao konkurentan materijal klasičnim čeličnim konstrukcijama, osobito u projektima gdje se zahtijevaju lagane, trajne i estetski prilagodljive konstrukcije.



Slika 1. Autocestovni most Arvida u Quebecu, Kanada [3]



Slika 2. Terminal međunarodne zračne luke Kansai (Osaka, Japan) [4]

Pored navedenih građevina, postoji još nekoliko primjera gdje je aluminij korišten kao glavna nosiva konstrukcija ili kao fasada ili dio enterijera.

- Alcoa Building (Pittsburgh, SAD) [5]
- Vembli stadion (London, Velika Britanija) [6]
- Autocestovni most Arvida u Quebecu, Kanada [3]
- 30 St Mary Axe – “The Gherkin” (London, Velika Britanija) [7]
- Muzej suvremene umjetnosti (Niterói, Brazil) [8]
- Planetarijum u Šangaju (legura 6061-T6) [9]
- Aluminijski dalekovodni tornjevi u Napulju [1]

2. Pregled područja istraživanja

Ponašanje aluminija na visokim temperaturama, posebno u kontekstu puzanja, ključno je za razumijevanje njegove dugotrajne nosivosti u konstrukcijama koje su izložene povišenim temperaturama. Kao što je već u prethodnom poglavlju spomenuto aluminij ima nisku temperaturu taljenja, te zbog toga dolazi do smanjenja mehaničkih svojstava već na 100 °C, i pojave deformacija od puzanja koje u požarnim uvjetima dodatno smanjuju nosivost konstrukcijskog elementa.

Kada metalni materijal pod djelovanjem vanjskog opterećenja dosegne razinu naprezanja veću od granice tečenja, dolazi do plastične deformacije. U klasičnim uvjetima, naprezanja ispod granice tečenja uzrokuju isključivo elastične deformacije koje nestaju uklanjanjem opterećenja. Ipak, ovo se pravilo mijenja pri povišenim temperaturama. Naime, kada temperatura materijala prijeđe približno 25–30% njegove apsolutne temperature tališta, pojavljuju se trajne deformacije i pri razinama naprezanja koje su nominalno ispod granice tečenja. Posebnost ove pojave je njezin vremenski ovisan karakter, deformacije se ne javljaju trenutačno, već postupno napreduju tijekom vremena izloženosti opterećenju. Upravo zbog te progresivnosti, fenomen se u tehničkoj literaturi definira kao puzanje (eng. creep), a njegovo poznavanje i kvantificiranje od presudne je važnosti pri analizi dugotrajne nosivosti konstrukcija izloženih termomehaničkim utjecajima.

Procjena deformacija od puzanja može biti ključna za razumijevanje prijevremenog otkazivanja nosivosti glavnih konstrukcijskih elemenata, pa je iz tog razloga potrebno uraditi opsežnu eksperimentalnu i numeričku studiju ponašanja pojedinih aluminijskih legura na djelovanje požara.

Prvi znanstvenici koji su istraživali pojavu puzanja pri visokim temperaturama bili su Dorn [10,11] i Harmathy [12]. Njihov rad značajno je pridonio razumijevanju mehaničkih svojstava aluminija na povišenim temperaturama, što je ključno za primjene u kojima su materijali izloženi visokoj temperaturi, kao što je scenarij požara. U 1950-ima, Dorn je predložio model za opisivanje sekundarnog puzanja u metalima, koje je karakterizirano deformacijom ovisnom o vremenu pod stalnim naprezanjem. Ovaj režim puzanja obično se javlja nakon početne prijelazne faze, pod utjecajem ranijih uvjeta opterećenja i mikrostrukturnih čimbenika. Značaj Dornovog modela temelji se na predviđanju

ponašanja metala na visokim temperaturama i naprezanju. Glavni Dorn-ov zaključak bio je da na niskim temperaturama nema deformacija od puzanja i njegov rad predstavljao je bazu za daljnja istraživanja složenog fenomena puzanja posebno u vezi s aluminijem kao materijalom.

Nadovezujući se na Dorn-ov [10,11] rad, Harmathy [12-14] je proširio model puzanja kako bi uključio primarno puzanje, što je početna faza deformacije koja se događa kada je materijal prvi put izložen naprezanju. Harmathyjev doprinos bio je ključan za stvaranje sveobuhvatnijeg okvira koji bi mogao učinkovito opisati cijeli raspon ponašanja puzanja, od početka naprezanja do ravnoteže pri sekundarnom puzanju. Njegove modifikacije omogućile su modeliranje progiba konstrukcijskih elemenata izloženih požaru, proširujući praktičnu primjenu modela izvan čiste metalurgije na građevinarstvo i sigurnost konstrukcija. Značaj Harmathyjeva doprinosa leži u tome što je on napravio numerički model za proračun puzanja u slučajevima nestacionarnog zagrijavanja elemenata. Ovo ima poseban značaj uzimajući u obzir da nestacionarno zagrijavanje predstavlja realnu sliku stvarnog požara.

Najznačajniji doprinos istraživanju fenomena puzanja u aluminijskim konstrukcijama dao je Maljaars [15–20]. Njegov rad obuhvaća širok spektar istraživanja, od eksperimentalnih ispitivanja najčešće korištenih aluminijskih legura u građevinskoj praksi (serije 5xxx i 6xxx), do razvoja teorijskih i numeričkih modela koji omogućuju opis ponašanja konstrukcija pod dugotrajnim opterećenjem. Posebna vrijednost njegovih istraživanja ogleda se u tome što se nije ograničio samo na inicijalnu fazu puzanja, već je uveo modele koji uključuju i sekundarnu te tercijarnu fazu, čime je omogućeno realnije predviđanje graničnih stanja nosivosti konstrukcija. U svojim radovima Maljaars naglašava i izražen deficit dostupnih eksperimentalnih podataka i validiranih modela koji bi vjerodostojno opisali ponašanje aluminijskih elemenata u požarnim uvjetima. Dodatno, bavio se problematikom lokalnog izvijanja vitkih, tankostijenih elemenata izloženih visokim temperaturama te razvojem numeričkih modela koji integriraju i efekt puzanja u analizi nosivosti. Eksperimentalna istraživanja provedena su na legurama 5083-H111 i 6060-T66, a pritom je predložen novi konstitutivni model koji uvažava degradaciju mehaničkih svojstava uslijed povećanja temperature.

Jedan od ključnih zaključaka Maljaarsovih istraživanja odnosi se na ograničenja postojećeg pristupa definiranog u Eurokodu 9 [32]. Naime, trenutna metodologija se temelji na stacionarnim ispitivanjima koja ne odražavaju dovoljno realistično uvjete požara, što dovodi do određenih nesigurnosti u proračunu otpornosti konstrukcija. Uz to, Maljaars je ukazao na primjenjivost klasičnih teorijskih modela Dorn-a i Harmathy-a za legure serije 5xxx, dok je za legure serije 6xxx pokazano da njihova prediktivna vrijednost nije dostatna.

S obzirom na rezultate istraživanja, posebno su problematične vrlo visoke temperature pri kojima aluminij gubi nosivost već iznad 350 °C, što dovodi u pitanje praktičnu relevantnost puzanja u tom temperaturnom području. S druge strane, ranija istraživanja [30] i rezultati koje potvrđuje i Maljaars ukazuju da je za inženjerske proračune realan i kritičan temperaturni interval u kojem se puzanje razvija

između 150 °C i 300 °C, pri čemu je odlučujući faktor trajanje izloženosti i razina djelujućeg opterećenja.

U svojim radovima Kandare i sur. [21,22] napravili su model puzanja koji se bazira na Maljaars-ovom analitičkom modelu. Ovaj model obuhvaća primarnu i sekundarnu fazu puzanja i verificiran je eksperimentalnim ispitivanjima na aluminijskim pločama izloženim tlaku od aluminijskih legura 5083 H116 i 6082 T6. Model dobro predviđa vrijeme i temperaturu pri konačnom otkazivanju pri izvijanju. Pozitivna stvar leži u tome što je model jednostavan i može se primjenjivati u svakodnevnim inženjerskim proračunima, a negativna stvar leži u tome što je verificiran samo na jednostavne geometrije, pa ga je potrebno verificirati na složene konstrukcije i presjeke poput I profila.

Jiang i sur. [23] su u svom radu proveli opsežnu studiju unutar koje su izvršili eksperimentalno i numeričko istraživanje ponašanja aluminijskih stupova od legure 6061-T6 pri djelovanju povišenih temperatura i tlačnom opterećenju. Ispitivanja su provedena na ukupno 108 uzoraka od čega je 60 uzoraka pravokutnog poprečnog presjeka, a 48 su kružne cijevi. Stupovi su ispitivani pod tlačnim opterećenjem i različitim temperaturnim intervalima u rasponu od 20 °C do 400 °C, što predstavlja realan temperaturni okvir za ispitivanje, jer aluminij iznad 350 °C gubi nosivost. Osim eksperimentalne analize provedena je nelinearna numerička analiza u softveru ANSYS, provedeno je ukupno 8829 FE simulacija uzimajući u obzir geometrijsku i materijalnu nelinearnost, različite geometrije, temperature i materijale. Glavni zaključci ovog provedenog istraživanja leže u činjenici da su svi stupovi otkazali uslijed fleksijskog izvijanja, pri čemu je povećanje temperature umanjilo njihovu stabilnost. Pored toga, predložene su nove formule i pokazale su bolju točnost u predviđanju nosivosti stupova u usporedbi s postojećim dizajnerskim normama EC 9 [32], koje su često konzervativne.

Zheng i Zhang [24] su analizirali ponašanje aluminijskih I-greda (legure 5083-H112 i 6060-T66) izloženih požaru, s ciljem unapređenja proračuna njihove nosivosti u požarnim uvjetima. Korištenjem metode konačnih elemenata izračunata su temperaturna polja za nezaštićene i zaštićene grede zagrijavane s tri strane, a rezultati su uspoređeni s formulama za izračun temperature prema EC 9 [32]. Nadalje, razvijeni su numerički modeli za simulaciju savojnog i savojno-torzijskog izvijanja pri povišenim temperaturama, pri čemu je numerički pristup validiran eksperimentalnim podacima. Na temelju provedene parametarske analize predložene su pojednostavljene formule za određivanje kritičnih temperatura, a njihova točnost je uspoređena s rezultatima prema EC 9 [32]. Autori zaključuju da EC 9 [32] u većini slučajeva daje konzervativne rezultate, posebno kod elemenata s visokim koeficijentom iskorištenosti, gdje su u nekim zonama izmjerene više kritične temperature od predviđenih. Također, utvrđeno je da povećanje opterećenja, globalne vitkosti te omjera debljine protupožarne zaštite i toplinske vodljivosti dovodi do smanjenja kritičnih temperatura greda.

Torić i suradnici [25] proveli su istraživanje s ciljem ispitivanja utjecaja deformacija od puzanja na ponašanje aluminijskih stupova od legure EN AW 6082-T6 pri povišenim temperaturama. Ukupno je

ispitano 17 stupova duljine približno 2,6 m, pri čemu je na osam stupova ispitana nosivost do otkaza (testovi kapaciteta nosivosti), dok je devet stupova ispitano na temperaturama između 160 °C i 260 °C radi praćenja deformacija od puzanja. Dobiveni rezultati ukazali su na izražen pad tlačne otpornosti stupova, osobito pri opterećenjima većim od 90 % njihove aksijalne nosivosti.

Na temelju opažanja predloženi su termomehanički kriteriji koji omogućuju određivanje graničnih vrijednosti opterećenja pri različitim temperaturama, uzimajući u obzir mogućnost izvijanja uslijed puzanja unutar razdoblja od 240 minuta. Ovo razdoblje od 240 minuta odgovara zahtjevima požarne otpornosti za visoke zgrade. Autori su istaknuli da postojeći proračunski postupci, uključujući Eurokod 9 [32], ne obuhvaćaju učinke puzanja pri visokim temperaturama, premda ono ima presudan utjecaj na stabilnost aluminijskih elemenata u požarnim uvjetima. Zaključeno je da je potrebno daljnje unaprijeđenje projektnih normi koje će sustavno uključivati dugotrajno termičko opterećenje (požar) i mehanizme puzanja povezane s izvijanjem kao što je prikazano u ovome radu.

Eberg i sur. [26] proveli su jedno od najranijih sistematskih eksperimentalnih istraživanja utjecaja puzanja na ponašanje aluminijskih konstrukcijskih elemenata pri povišenim temperaturama. U izvještaju SINTEF-a iz 1996. godine analizirano je ponašanje stupova izrađenih od legure AW 6082 u različitim toplinskim stanjima (T4 i T6). Rezultati su pokazali da puzanje ima značajan utjecaj na smanjenje nosivosti stupova pri temperaturama relevantnima za požarne uvjete.

Dobiveni eksperimentalni podaci poslužili su za validaciju materijalnog modela implementiranog u numerički alat USFOS, koji se koristi za analizu progresivnog kolapsa konstrukcija. Usporedbom eksperimentalnih rezultata sa standardnim krivuljama izvijanja potvrđeno je da projektne norme koje zanemaruju puzanje mogu dovesti do precjenjivanja nosivosti. Ovaj rad dao je snažan poticaj za daljnja istraživanja i ukazao na nužnost uključivanja efekata puzanja u projektne norme za aluminijske konstrukcije izložene požaru.

Chapman i sur. [27] proveli su jedno od prvih sveobuhvatnih istraživanja fenomena izvijanja pod utjecajem puzanja. U njihovom teorijskom i eksperimentalnom radu razvijen je model koji integrira elastične i vremenski ovisne deformacije radi predviđanja vremena do izvijanja stupova izloženih konstantnom opterećenju pri povišenim temperaturama. Rezultati ovog istraživanja postavili su temelje za kasniji razvoj numeričkih i analitičkih modela izvijanja uz prisutnost puzanja te su i danas referentni u analizi dugotrajnog ponašanja konstrukcija u visokotemperaturnim uvjetima.

Thomopoulos i Prefitsi [28] usmjerili su svoja istraživanja na ispitivanje utjecaja vremenski ovisnih deformacija od puzanja na ukupni progib aluminijskih konstrukcijskih elemenata. Analizirali su jednostavan, ali reprezentativan model – prosta greda od legure EN AW 6061-T6 duljine 3000 mm,

opterećena koncentriranom silom u sredini raspona. Eksperimentalni rezultati pokazali su da i kod ovako jednostavne geometrije učinci puzanja imaju mjerljiv i značajan doprinos ukupnoj deformaciji konstrukcije. U okviru studije autori su predložili pojednostavljene metode za procjenu progiba kod konstrukcija koje su izložene povišenim temperaturama i dugotrajnom opterećenju. Dobiveni rezultati ukazuju na to da zanemarivanje puzanja u analizi može dovesti do ozbiljnog podcjenjivanja deformacija. Posebno je indikativan nalaz da se na temperaturi od 200 °C deformacija uzrokovana puzanjem može popeti i do 29 % ukupnog progiba grede.

Ovaj primjer jasno pokazuje da vremenski ovisne deformacije ne predstavljaju samo teorijski problem, već imaju i praktične implikacije pri dimenzioniranju i ocjeni uporabivosti aluminijskih konstrukcija. Premda je istraživanje provedeno na relativno jednostavnom sustavu, zaključci imaju širu važnost jer ukazuju na potrebu da se puzanje obavezno uvrsti u analitičke i numeričke proračune, čak i kod konstrukcija skromne složenosti. Time je otvoren prostor za daljnja istraživanja u kojima bi se razvile općenitije metode za prognozu deformacija kod složenijih konstrukcijskih sustava i različitih uvjeta opterećenja i temperature.

Summers i sur. u svom radu [29] sustavno su analizirali mehanička svojstva aluminijskih legura izloženih visokim temperaturama, s posebnim naglaskom na ponašanje tijekom požara i nakon njegovog prestanka. Autori su prikupili i kritički obradili rezultate dostupnih eksperimentalnih istraživanja koja se odnose na promjene u granici tečenja, vlačnoj čvrstoći, modulu elastičnosti i duktilnosti aluminijskih legura pri povišenim temperaturama.

Posebna pažnja posvećena je razlikama u ponašanju legura različitih serija, s obzirom na njihovu kemijsku osnovu i mehanizme očvršćivanja. U radu je naglašeno da se legure koje se očvršćuju precipitacijama (npr. serija 6xxx i 7xxx) znatno brže degradiraju pri povišenim temperaturama zbog raspada precipitata, dok legure očvrstjele deformacijom (npr. serija 5xxx) pokazuju veću stabilnost. Autori su također istaknuli važnost razmatranja trajnih deformacija od puzanja, budući da one mogu imati ključan utjecaj na nosivost konstrukcija izloženih dugotrajnom djelovanju visokih temperatura. Naglašena je i činjenica da požar ne utječe samo na ponašanje konstrukcije tijekom samog događaja, nego i na rezidualna mehanička svojstva nakon hlađenja, što je od presudne važnosti za procjenu mogućnosti reparacije ili nastavka uporabe konstrukcije.

Glavni doprinos ovog rada ogleda se u pružanju objedinjene baze podataka i interpretacija o ponašanju aluminijskih konstrukcija pri požaru, čime se popunjava značajna praznina u znanstvenoj literaturi. Time je rad poslužio kao temelj za daljnja istraživanja i razvoj proračunskih modela koji bi mogli unaprijediti postupke projektiranja i ocjene sigurnosti aluminijskih konstrukcija u uvjetima požara.

Torić i sur. [30] proveli su eksperimentalno ispitivanje aluminijskih epruveta od legure EN AW 6082 T6 na povišenim temperaturama. U ovom istraživanju provedena su ispitivanja mehaničkih svojstava ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $350\text{ }^{\circ}\text{C}$) i testovi puzanja ($150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $300\text{ }^{\circ}\text{C}$). Glavni zaključak ovih provedenih ispitivanja jeste da je kritični temperaturni interval za razvoj puzanja $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. U sklopu ovog istraživanja razvili su analitički model puzanja i usporedili ga s rezultatima stacionarnih testova i dobili dobro poklapanje rezultata.

Liu i sur. [31] proveli su istraživanje unutar kojeg su analizirali ponašanje aluminijskih tankostijenih stupova (6060-T66) nepravilnog poprečnog presjeka pri djelovanju aksijalnog tlaka i visokih temperatura. U sklopu ovoga istraživanja bavili su se analizom utjecaja povišenih temperatura na mehanička svojstva materijala kao što su granica razvlačenja, modul elastičnosti i čvrstoća na zatezanje. Pored toga, unutar istraživanja bavili su se oblicima otkazivanja nosivosti stupova, te su predložili modifikaciju norme EN 1999-1-2 [32] za predviđanje granične čvrstoće iz razloga što je EC 9 [32] za pojedine temperature i duljine stupova davao previše konzervativne rezultate. Bitno je spomenuti da se rezultati predložene modifikacije dobro slažu s provedenim numeričkim analizama.

Goreta [33] je u svojoj doktorskoj disertaciji istraživao utjecaj vremenski ovisnih deformacija uslijed puzanja na kritičnu temperaturu i vrijeme otkazivanja tlačno opterećenih aluminijskih stupova izrađenih od legure EN AW 6082 T6, pri čemu je poseban naglasak stavljen na uvjete nestacionarnog zagrijavanja. Kao polazište istaknuta je činjenica da nestacionarni temperaturni režimi realno oponašaju razvoj požara pod djelovanjem stalnog opterećenja, dok postojeći normativni proračunski modeli ne uključuju učinke puzanja niti njihovu ulogu u smanjenju nosivosti i ranijem otkazivanju konstrukcija. U širem kontekstu, Goreta [33] je naglasio važnost istraživanja ovog problema s obzirom na rastuću uporabu aluminijskih legura u građevinskim konstrukcijama i njihovu osjetljivost na povišene temperature. Naime, pad mehaničkih svojstava kod aluminija započinje već pri temperaturama iznad $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, što značajno smanjuje otpornost na tlačna opterećenja i povećava rizik od preranog otkazivanja. Eksperimentalni dio istraživanja obuhvatio je kalibraciju modela puzanja na temelju ispitivanja epruveta od navedene legure. Dobiveni parametri zatim su implementirani u numeričko-eksperimentalni model za analizu tlačno opterećenih stupova izloženih nestacionarnom porastu temperature. Eksperimenti su provedeni pri niskim brzinama zagrijavanja ($1\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$), čime je simuliran učinak pasivne protupožarne zaštite i stvorena usporedba s uvjetima predviđenim suvremenim projektantskim pristupima. Na temelju provedenih analiza, Goreta [33] je proveo parametarsko ispitivanje osjetljivosti stupova na različite režime zagrijavanja. Rezultati su pokazali da puzanje predstavlja dominantan mehanizam degradacije nosivosti, a njegova uloga postaje izražena osobito pri nižim brzinama porasta temperature, kada se akumulacija deformacija odvija progresivno kroz dulje

vremensko razdoblje. Time je naglašena potreba za uvođenjem vremenski ovisnih efekata u proračune otpornosti aluminijskih konstrukcija na požar, budući da se zanemarivanjem puzanja značajno podcjenjuje rizik od otkazivanja.

Ma i sur. [35] istražili su stabilnost aluminijskih stupova od legure 6082-T6 pod aksijalnim tlačnim opterećenjem pri povišenim temperaturama. Eksperimentalno je potvrđeno da svi stupovi gube nosivost izvijanjem, a numerički modeli konačnih elemenata dobro su reproducirali opaženo ponašanje. Na temelju velikog broja simulacija razvijena je empirijska formula za koeficijent stabilnosti koja daje točnije rezultate od postojećih normativnih proračuna (GB i EC 9) pri različitim temperaturama.

Zhu i sur. [36] numerički su istražili ponašanje aluminijskih stupova s „C“ poprečnim presjekom pri povišenim temperaturama. Nelinearni numerički model validiran na 27 pokusa, poslužio je za parametarsku studiju s ukupno 360 stupova od legura 6061-T6 i 6063-T5, različitih duljina (360, 1000 i 2000 mm) i pri temperaturama do 600 °C. Usporedbom s američkim, australsko-novozelandskim i europskim normama utvrđeno je da standardni proračuni i norme odstupaju od numeričkih predviđanja, što naglašava potrebu za preciznijim metodama ocjene nosivosti pri požarnim uvjetima.

Yu i sur. [37] proveli su eksperimentalno i numeričko istraživanje nosivosti aluminijskih stupova od legure 6082-T6 pri ekscentričnom tlačnom opterećenju na povišenim temperaturama. Testirana su mehanička svojstva materijala i 32 stupa, pri čemu je kod svih stupova utvrđeno fleksiono izvijanje, te smanjenje nosivosti s povećanjem temperature i ekscentriciteta. Na temelju 652 numerička modela razvijene su korelacijske krivulje te predložen korekcijski koeficijent za unapređenje projektnih formula i normi. Predloženi pristup pokazao je dobru usklađenost s eksperimentalnim rezultatima i odgovarajuću razinu pouzdanosti za primjenu u projektiranju aluminijskih konstrukcija.

Han i sur. [38] proveli su istraživanje lokalnog izvijanja aluminijskih ploča u požarnim uvjetima s ciljem unapređenja projektnih metoda. Na temelju validiranih FE modela provedena je parametarska analiza za različite aluminijske legure, vitkosti, temperature, rubne uvjete i opterećenja. Utvrđeno je da postojeće projektne metode (norme) daju konzervativna i nekonzistentna predviđanja, zbog čega su autori predložili nove granice klasifikacije presjeka i metodu efektivne debljine koja uzima u obzir promjene mehaničkih svojstava pri povišenim temperaturama, čime se postiže točnija i pouzdanija procjena otpornosti.

Li i sur. [39] proveli su sustavno istraživanje mehaničkih svojstava aluminijske legure visoke čvrstoće 6013-T6 pri povišenim temperaturama i nakon hlađenja u zraku i vodi. U okviru 57 vlačnih ispitivanja analizirani su modul elastičnosti, granica popuštanja, vlačna čvrstoća, granična deformacija i promjene mikrostrukture. Rezultati su pokazali značajnu degradaciju čvrstoće i krutosti iznad 200 °C, s

ekstremnim padom ispod 10 % početnih vrijednosti na 400 °C, ali i djelomičnim oporavkom nakon hlađenja. Predložene su prediktivne jednadžbe te dvofazni Ramberg–Osgoodov model, koji omogućuju pouzdano opisivanje ponašanja legure 6013-T6 u požarnim i postpožarnim uvjetima.

Wang i sur. [40] dali su pregled dosadašnjih istraživanja o ponašanju aluminijskih konstrukcija u požarnim uvjetima. Analizirali su termička i mehanička svojstva legura, rezultate ispitivanja elemenata, spojeva i sustava te ocijenili primjenjivost postojećih normi. Uočili su da postojeći projektni proračuni često daju konzervativne ili nepouz dane rezultate, a posebno nedostaju podaci za spojeve i cjelovite konstrukcije. Autori predlažu daljnja istraživanja i razvoj metoda koje će realnije opisati nosivost aluminijskih konstrukcija pri požaru te učinkovitije uključiti zaštitne mjere.

Pregled dostupne literature pokazuje da postoji značajan nedostatak istraživanja koja detaljno razmatraju utjecaj deformacija od puzanja na nosivost konstrukcijskih elemenata u uvjetima požara. Većina dosadašnjih studija temelji se na stacionarnim ispitivanjima, dok su istraživanja provedena u nestacionarnim uvjetima značajno rjeđa. Glavni razlog tome jest činjenica da su nestacionarni pokusi metodološki zahtjevniji i eksperimentalno kompleksniji, ali upravo oni omogućuju realističniji prikaz termomehantičkog ponašanja konstrukcija u uvjetima požara. Za razliku od toga, stacionarni testovi, iako jednostavniji za provedbu, primarno služe za određivanje mehaničkih svojstava materijala i procjenu nosivosti pri djelovanju konstantne temperature, što samo djelomično odražava stvarne uvjete. Stoga se ističe potreba za većim brojem istraživanja u kojima će se u obzir uzimati vremenski promjenjivi toplinski tokovi, budući da oni pružaju vjerodostojniji uvid u ponašanje aluminijskih konstrukcija tijekom realnih scenarija požara.

Također, bitno je i spomenuti da su trenutne norme prilično konzervativne i da zahtijevaju određene korekcije. Ovo se ogleda u činjenici da trenutne norme [32] ne uzimaju eksplicitno u obzir temperaturu, razinu naprezanja, vrijeme izloženosti, vrstu legure ni oblik poprečnog presjeka. Sve ove pobrojane elemente norma uzima u obzir preko zajedničkog koeficijenta 1,2 što je prilično konzervativno i ne predstavlja realnu sliku ponašanja nekog elementa tijekom požara. Sve ovo nam govori da je potrebno izvršiti što više testova kapaciteta (nosivosti) i puzanja za različite legure i za različite temperaturne razine kako bismo dobili realnu sliku ponašanja aluminijskih konstrukcijskih elemenata pri djelovanju požara.

3. Planirana tema istraživanja

3.1. Vrste ispitivanja

Kako bi se mogla pouzdano odrediti nosivost konstrukcijskih elemenata na povišenim temperaturama potrebno je provesti sljedeća ispitivanja:

- stacionarni testovi (test uz konstantnu temperaturu)
- nestacionarni testovi (test uz konstantni prirast temperature)

Stacionarni testovi koriste se za određivanje kapaciteta nosivosti elemenata i mehaničkih karakteristika materijala kao što je granica razvlačenja, modul elastičnosti, čvrstoća na zatezanje. Bitno je napomenuti da se norma EN 1999-1-2 [32] temelji na stacionarnim ispitivanjima materijala. Ovi testovi se izvode na način da se epruveta ili element izloži konstantnoj temperaturi uz prirast opterećenja sve do loma.

Nestacionarni testovi se izvode uz konstantno opterećenje i uz prirast temperature do sloma epruvete ili elementa konstrukcije i time se omogućuje istraživanje različitih brzina zagrijavanja na kritično vrijeme otkazivanja konstrukcijskog elementa ili cijele konstrukcije. U znanstvenoj zajednici općenito postoji nedostatak nestacionarnih ispitivanja što zbog složenosti što zbog većeg broja parametara koje treba pratiti tijekom testa.

3.2. Puzanje aluminija pri visokim temperaturama

Puzanje aluminija je proces nastanka postepene plastične deformacije materijala pod konstantnim naprezanjem i povišenim temperaturama. Za materijal kao što je aluminij, puzanje se javlja i postaje značajno već pri temperaturama od 150 – 200 °C, jer aluminij ima nisku temperaturu tališta oko 660 °C.

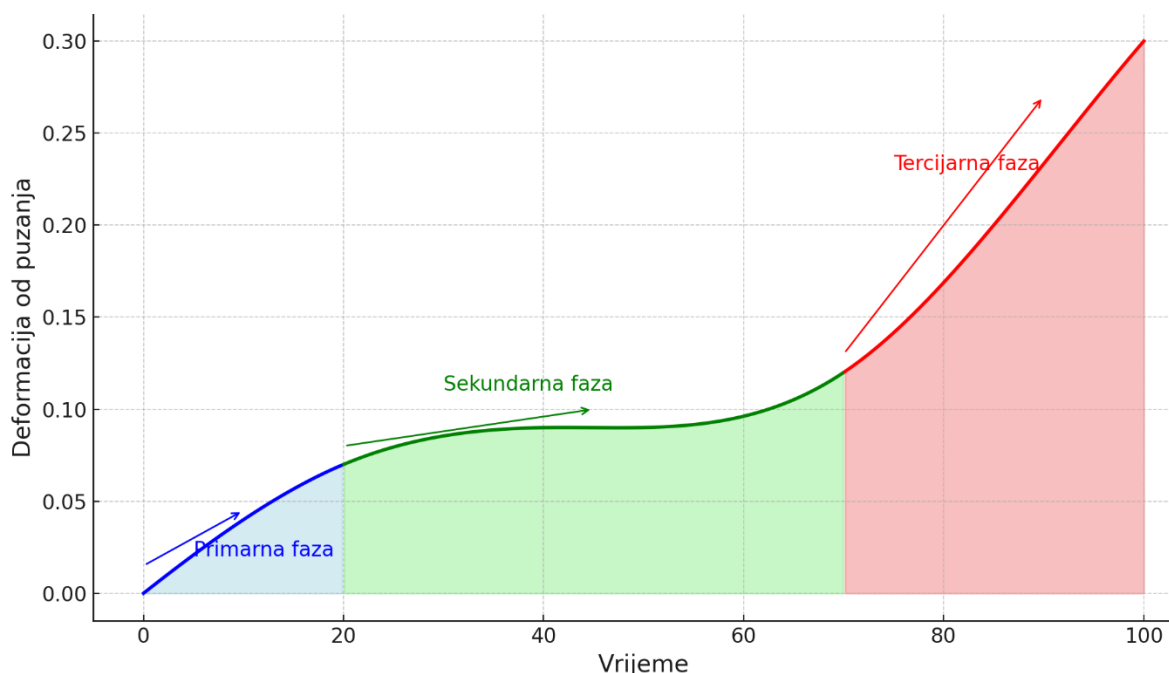
Faktori koji utječu na puzanje aluminija su sljedeći:

- naprezanje
- temperatura
- legura
- trajanje opterećenja
- mikrostruktura i toplinska obrada

Puzanje se dijeli u tri faze (slika 3):

- **primarna faza** (započinje neposredno nakon primjene opterećenja, pri čemu ukupna deformacija uključuje elastičnu i plastičnu komponentu. U ovoj fazi stopa puzanja postupno opada zbog mehanizama očvršćivanja koji se odvijaju unutar kristalne rešetke materijala),
- **sekundarna faza** (u ovoj fazi imamo konstantan prirast puzanja),

- **tercijarna faza** (dolazi do progresivnog ubrzanja deformacija, najčešće uslijed nastanka i širenja mikropukotina ili lokalne nestabilnosti, što u konačnici vodi do loma materijala).



Slika 3. Faze puzanja

Puzanje je proces koji uvelike ovisi o mikrostrukturi materijala, a njegovo se modeliranje već dugi niz godina temelji na empirijskim pristupima s više podesivih parametara koji opisuju mehanizme očvršćivanja dislokacija unutar kristalne strukture materijala. Kod aluminija izloženog visokim temperaturama, puzanje se najčešće opisuje modelima temeljenima na vremenskom i deformacijskom očvršćivanju, pri čemu se deformacije mogu procijeniti analitičkim, poluempirijskim ili reološkim metodama.

3.3. Vremensko očvršćivanje

Model vremenskog očvršćivanja aluminija (engl. time hardening model) koristi se za opisivanje ponašanja materijala tijekom puzanja, pri čemu se otpornost na deformaciju povećava s vremenom, neovisno o trenutnom stupnju deformacije. Drugim riječima, materijal postaje "tvrđi" kako vrijeme prolazi, čak i ako se deformacija ne mijenja značajno. Ovo očvršćivanje materijala događa se zbog taloženja faza, istiskivanja dislokacija, rasta zrna i vremenskog ojačavanja.

Model vremenskog očvršćivanja koristi se kada ne postoji značajna promjena naprezanja tijekom vremena, i predstavlja najjednostavniji model za proračun deformacije od puzanja. Prema jednadžbi (1) deformacija od puzanja je funkcija naprezanja, deformacije, vremena i temperature.

$$\varepsilon_{cr} = f_1(\sigma) f_2(\varepsilon) f_3(t) f_4(T) \quad (1)$$

3.4. Deformacijsko očvršćivanje

Model deformacijskog očvršćivanja (engl. strain hardening) odnosi se na povećanje otpornosti materijala na daljnju plastičnu deformaciju koja se ogleda kao posljedica prethodne akumulirane deformacije. Bitno je napomenuti da se ovaj model koristi kada se razina naprezanja značajno mijenja tijekom vremena i pogodan je za slučajeve kada se koriste stacionarni testovi ispitivanja.

Deformacijsko očvršćivanje nastaje zbog:

- blokiranja dislokacija na granicama zrna
- nakupljanja dislokacija i njihove međusobne interakcije

Deformacija od puzanja za model vremenskog očvršćivanja računa se prema jednadžbi (2):

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma^n \cdot \epsilon^m \quad (2)$$

gdje je:

$\dot{\epsilon}$ – brzina puzanja,

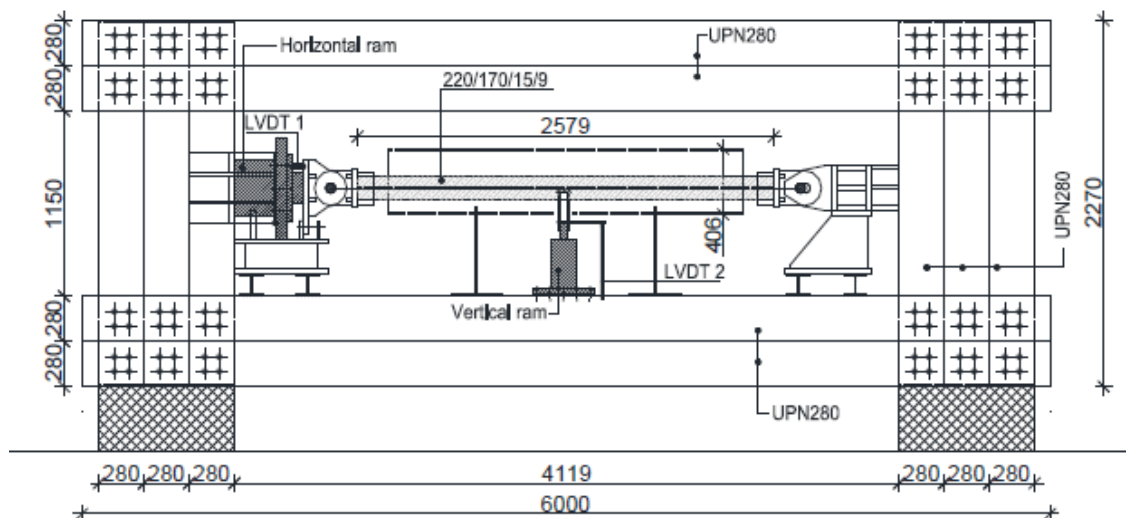
A, n, m - materijalni parametri koji se dobivaju eksperimentalno,

σ – naprezanje,

ϵ – trenutačno akumulirana deformacija.

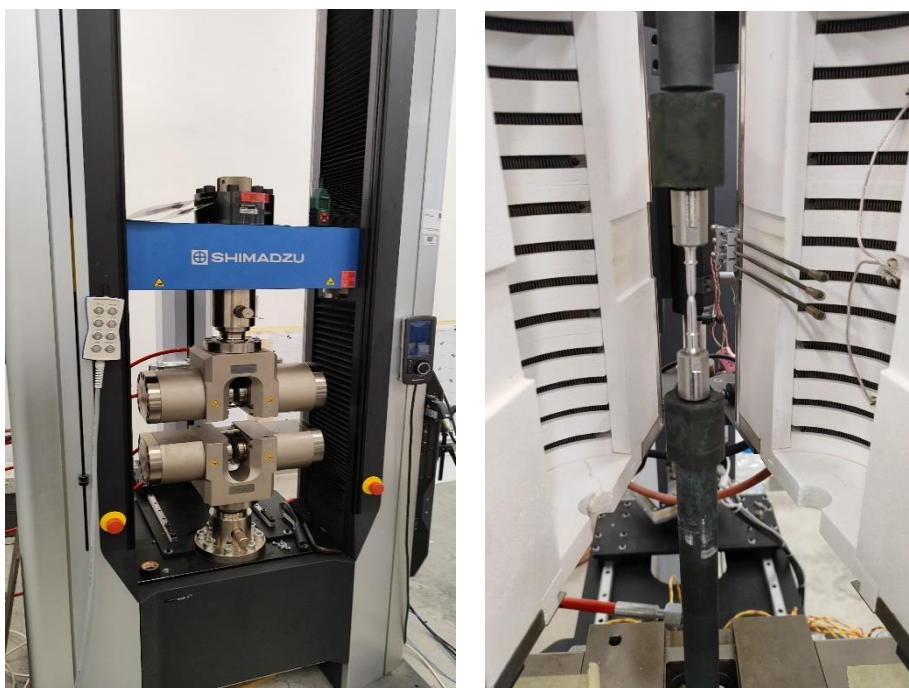
3.5. Laboratorij i oprema za mjerenje

Eksperimentalna ispitivanja u sklopu ove disertacije provodit će se u Laboratoriju za konstrukcije, u sklopu jedinice namijenjene za požarna ispitivanja nosivosti građevinskih elemenata na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu. Za potrebe istraživanja izrađen je ispitni okvir u obliku čelične konstrukcije, ukupne visine 2270 mm i duljine 6000 mm, koja je učvršćena na betonskoj osnovi (slika 4). Nosivi sustav okvira sastoji se od masivnih UPN 280 profila, međusobno spojenih kombinacijom zavarenih spojeva i vijaka M27. Takva izvedba omogućuje dovoljnu prostornu krutost i stabilnost konstrukcije, te ujedno sprječava pojavu horizontalnih pomaka koji bi mogli kompromitirati točnost i pouzdanost ispitivanja.



Slika 4. Okvir za testiranje [34]

Okvir je napravljen tako da se u njegovu sredinu postavlja stup u horizontalni položaj i zglobovno je pridrzan na oba kraja. Lijevi ležaj je pomičan jer se tu nalazi hidraulička preša pomoću koje unosimo horizontalnu silu u element, dok je desni ležaj nepokretan i onemogućeno je horizontalno pomicanje u uzdužnom smjeru. Kako bi simulirali geometrijske nesavršenosti i neutralizirali vlastitu težinu stupa koristit ćemo vertikalnu prešu i unijeti vertikalnu silu prema gore, kako bi omogućili otkazivanje stupa prema gore. Lijevi i desni ležaj ovoga okvira su napravljeni od čeličnih uložaka odgovarajućih dimenzija i spojeni su pomoću čeličnih bolcena promjera $\varnothing 60$. Kako bi se utjecaj trenja smanjio na najmanju moguću mjeru bolceni će se izbrusiti oko rupi i namazati keramičkom mašću. Kao što je prikazano na slici 4, mjerenje horizontalnih i vertikalnih pomaka provodit će se pomoću LVDT-ova 1 i 2 koji će biti postavljeni na horizontalnu i vertikalnu prešu. Za kontrolu zagrijavanja koristit ćemo termoparove koji će biti postavljeni na pojasnicama i hrptu u pet točaka duž stupa. S obzirom na to da aluminij nije feromagnetičan za zagrijavanje stupa koristit ćemo indukcijski ProHeat 35 Miller uređaj. Proces zagrijavanja temelji se na omatanju čelične cijevi indukcijskim kabelima, čime se stvara magnetsko polje koje inducira povišenje temperature cijevi. Snaga stroja kojom se upravlja ovim postupkom doseže vrijednosti do 35 kW.



Slika 5. Kidalica – Shimadzu AGX-V, kapaciteta 250 [kN]

4. Smjernice za istraživanje i temu doktorata

Uzimajući u obzir trenutno stanje u znanstvenoj zajednici i rezultate pregleda literature, istraživanje u okviru ove disertacije temeljit će se na ispitivanju mehaničkih karakteristika na kidalici (slika 5.) aluminijske legure EN AW 6005A T6 na epruvetama pri sobnoj i povišenim temperaturama (stacionarni testovi kapaciteta), testovima puzanja na epruvetama na različitim temperaturama i različitim razinama opterećenja. Također, planirano je ispitivanje aluminijskih stupova izloženih nestacionarnom zagrijavanju, budući da takvi testovi realističnije opisuju ponašanje stupova tijekom požara. U okviru ove disertacije odabrani su stupovi za ispitivanje, jer predstavljaju jedne od najvažnijih konstrukcijskih elemenata s aspekta globalne stabilnosti konstrukcije. Pored gore navedenog, u okviru ove disertacije bit će izrađen numerički model puzanja u ANSYS-u za leguru EN AW 6005A T6 koji će biti verificiran s prethodno navedenim eksperimentalnim ispitivanjima.

Zahvala

Eksperimentalni dio istraživanja planiran je u Laboratoriju za konstrukcije Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu. Predviđeni testovi nadovezuju se na ranija istraživanja provedena u sklopu projekta Hrvatske zaklade za znanost „*Utjecaj deformacija od puzanja na nosivost čeličnih i aluminijskih stupova pri djelovanju požara*” (UIP-2014-09-5711), čime se osigurava kontinuitet u razvoju znanstvenih spoznaja o ponašanju konstrukcija pri povišenim temperaturama.

Literatura

- [1] D. Skejić, I. Boko, and N. Torić, "Aluminij kao materijal za suvremene konstrukcije," *Gradjevinar*, vol. 67, no. 11, pp. 1075–1085, 2015
- [2] <https://materialsdata.nist.gov/bitstream/handle/11115/173/Aluminum%20and%20Aluminum%20Alloys%20Davis.pdf> Alloying: Understanding the Basics J.R. Davis, Light Metals and Alloys p351-416, Copyright © 2001 ASM International® All rights reserved. www.asminternational.org
- [3] I. Boko, D. Skejić, N. Torić – Aluminijske konstrukcije, Udžbenik Sveučilišta u Splitu i Zagrebu, Izdavač: Sveučilište u Splitu, Sveučilište u Zagrebu, 2017.
- [4] <https://arquitecturaviva.com/works/aeropuerto-de-kansai-osaka-4>
- [5] <https://structurae.net/en/structures/alcoa-building>
- [6] <https://www.fosterandpartners.com/projects/wembley-stadium>
- [7] <https://www.fosterandpartners.com/projects/30-st-mary-axe>
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Niter%C3%B3i_Contemporary_Art_Museum#/media/File:Contemporary_Art_Museum_in_Niteroi_City_4.jpg
- [9] <https://www.ennead.com/work/shanghai-astronomy-museum>
- [10] O. D. Sherby, J. L. Lytton, and J. E. Dorn, "Activation energies for creep of high-purity aluminum," *Acta Metall.*, vol. 5, no. 4, pp. 219–227, 1957, doi: 10.1016/0001-6160(57)90169-4.
- [11] J. E. Dorn, "Some fundamental experiments on high temperature creep," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 3, no. 2, 1955, doi: 10.1016/0022-5096(55)90054-5.
- [12] T. Z. Harmathy, "A Comprehensive Creep Model," *J. Basic Eng.*, vol. 89, no. 3, p. 7, 1967.
- [13] T. Z. Harmathy, "Deflection and failure of steel-supported floors and beams in fire," *ASTM Int. West Conshocken, PA, USA*, vol. Special Te, pp. 40–62, 1967.
- [14] T. Z. Harmathy, "Creep Deflection of Metal Beams in Transient Heating Processes, With Particular Reference To Fire.," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 219–228, 1976, doi: 10.1139/176-022.
- [15] J. Maljaars, J. Fellingner, and F. Soetens, "Fire exposed aluminium structures," *Heron*, vol. 50, no. 4, pp. 261–278, 2005.
- [16] J. Maljaars, "Literature Study on Aluminium Structures Exposed to Fire," 2005.
- [17] J. Maljaars, F. Soetens, and L. Katgerman, "Constitutive model for aluminum alloys exposed to fire conditions," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 39 A, no. 4, pp. 778–789, 2008
- [18] J. Maljaars, F. Soetens, and H. H. Snijder, "Local buckling of aluminium structures exposed to fire. Part 1: Tests," *Thin-Walled Struct.*, vol. 47, no. 11, pp. 1404–1417, 2009
- [19] J. Maljaars, F. Soetens, and H. H. Snijder, "Local buckling of aluminium structures exposed to fire. Part 2: Finite element models," *Thin-Walled Struct.*, vol. 47, no. 11, pp. 1418–1428, 2009
- [20] J. Maljaars, L. Twilt, J. H. H. Fellingner, H. H. Snijder, and F. Soetens, "Aluminium structures exposed to fire conditions - An overview," *Heron*, vol. 55, no. 2, pp. 85–122, 2010.

- [21] E. Kandare, S. Feih, A. Kootsookos, Z. Mathys, B. Y. Lattimer, and A. P. Mouritz, "Creep-based life prediction modelling of aluminium in fire," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 527, no. 4–5, pp. 1185–1193, 2010, doi: 10.1016/j.msea.2009.10.010.
- [22] E. J. Fogle, B. Y. Lattimer, S. Feih, E. Kandare, A. P. Mouritz, and S. W. Case, "Compression load failure of aluminum plates due to fire," *Eng. Struct.*, vol. 34, pp. 155–162, 2012, doi: 10.1016/j.engstruct.2011.09.014.
- [23] Jiang, S.; Xiong, Z.; Guo, X.; He, Z. „Buckling behaviour of aluminium alloy columns under fire conditions“. *Thin-Walled Struct.* 2018, 124, 523–537.
- [24] Zheng, Y.Q.; Zhang, Z. „The fire performance and fire-resistance design of aluminium alloy I-beams“. *Fire Mater.* 2014, 40, 141–157.
- [25] N. Torić, I. Boko, I. W. Burgess, and V. Divić, "The effect of high-temperature creep on buckling behaviour of aluminium grade EN6082AW T6 columns," *Fire Saf. J.*, vol. 112, no. December 2019, 2020, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.102971.
- [26] Eberg, E.; Amdahl, J.; Langhelle, N.K. „Experimental Investigation of Creep Behaviour of Aluminium at Elevated Temperatures“, SINTEF Report No. STF22 F96713; SINTEF: Trondheim, Norway, 1996.
- [27] J. C. Chapman, B. Erickson, and N. J. Hoff, "A theoretical and experimental investigation of creep buckling," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 1, no. 2–3, pp. 145–174, 1960, doi: 10.1016/0020-7403(60)90037-0.
- [28] Thomopoulos A. Kimon and P. G. Foteini, "Creep in aluminium structures," pp. 435–442, 1999.
- [29] P. T. Summers *et al.*, "Overview of aluminum alloy mechanical properties during and after fires," *Fire Sci. Rev.*, vol. 4, no. 1, 2015
- [30] N. Torić, J. Brnić, I. Boko, M. Brčić, I. W. Burgess, and I. Uzelac, "Experimental analysis of the behaviour of aluminium alloy EN 6082AW T6 at high temperature," *Metals (Basel)*, vol. 7, no. 4, 2017
- [31] Liu, M.; Chang, Y.; Wang, P.; Zhnag, L. „Buckling behaviors of thin-walled aluminum alloy column with irregular-shaped cross section under axial compression in a fire“. *Thin-Walled Struct.* **2016**, 98, 230–243. [CrossRef]
- [32] E. odbor za Normizaciju, "HRN EN 1999-1-2 (2015), Eurokod 9: Projektiranje aluminijskih konstrukcija - Dio 1-2: Proračun konstrukcija na djelovanje požara." Bruxelles, Belgija, 2015.
- [33] M. Goreta, „Utjecaj vremenski ovisnih deformacija na nosivost aluminijskih stupova izloženih nestacionarnom zagrijavanju“, Disertacija, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, 2023.
- [34] M. Goreta, N. Torić, V. Divić, and I. Boko, "Testing the influence of creep on fire-exposed aluminium columns", 9th International Congress of Croatian Society of Mechanics, Split, Croatia, pp. 1–10, September, 2018.

- [35] Ma, H. H.; Hou, Q. C.; Yu, Z.; Ni, P., „Stability of 6082-T6 Aluminum Alloy Columns under Axial Forces at High Temperatures“. *Thin-Walled Structures* 2020, 157, 107083.
- [36] Zhu, J.-H.; Li, Z.-Q.; Su, M.-N., „Numerical Investigation and Design of Aluminium Alloy Channel Section Columns at Elevated Temperatures“. *Thin-Walled Structures* 2020, 157, 107225.
- [37] Yu, Z.; Ren, F.; Ma, H.; Zhang, A., „Experimental Study and Numerical Analysis on Bearing Capacity of 6082-T6 Aluminum Alloy Columns under Eccentric Compression at Elevated Temperatures“. *Thin-Walled Structures* 2022, 177, 109486
- [38] Han, Q.; Chen, J.; Chen, Y.; Young, B., „Local Buckling Behaviour and Design of Aluminium Alloy Plates in Fire“. *Thin-Walled Structures* 2023, 189, 110886.
- [39] Li, H.; Wang, Y.; Zhang, J.; Chen, X.; Zhao, L., „Elevated-Temperature and Post-Fire Performance of 6013-T6 High-Strength Aluminum Alloy“. *Thin-Walled Structures* 2024, 195, 111093.
- [40] Wang, Z.; Zhang, J.; Wang, Y.; Tan, K. H.; Burgess, I. W., „Structural Fire Behaviour of Aluminium Alloy Structures“: Review and Outlook. *Engineering Structures* 2022, 268, 114781.